第47卷　第12期
2024年12月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47　No. 12
Dec. 2024

石河子垦区绿洲农田下垫面辐射收支特征研究

张红伟[1,2,3,4]，　何　清[4]，　杨明凤[2]，　安冬亮[2,3]，　吴春霞[2,3]，
王　进[2,3]，　陈非凡[1,2,3,4]

（1. 新疆大学生态与环境学院，新疆　乌鲁木齐　830046；2. 乌兰乌苏农业气象试验站/乌兰乌苏生态与农业气象新疆野外科学观测研究站/乌兰乌苏国家综合气象观测专项试验外场基地，新疆　沙湾　832199；3. 石河子气象局，新疆　石河子　832000；4. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/新疆塔克拉玛干沙漠气象国家野外科学观测研究站/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地/新疆维吾尔自治区沙漠气象与沙尘暴重点实验室，新疆　乌鲁木齐　830002）

摘　要：绿洲农田是干旱半干旱区特有的生态系统，研究农田地表辐射收支对理解区域能量平衡及气候形成机制具有重要意义。利用石河子垦区乌兰乌苏农业气象试验站2021年4月—2022年3月在绿洲农田下垫面的观测数据，分析石河子垦区绿洲农田下垫面辐射分量和地表反照率的变化特征，将种植不同作物（棉花和玉米）农田地表的辐射分量进行对比，又与同区域的裸地进行了差异性分析。结果表明：(1) 石河子垦区绿洲农田下垫面向下的短波和长波辐射、向上长波辐射和净辐射的日均值在生长发育期高于非生长发育期，向上短波辐射冬季最大，振幅变化亦同。(2) 在同区域绿洲农田下垫面上种植不同农作物对向下的短波和长波辐射影响较小，在植物生长发育期，对向上的短波和长波辐射以及净辐射的影响显著，日均值最大相差分别为33.74 $W \cdot m^{-2}$、54.82 $W \cdot m^{-2}$和65.98 $W \cdot m^{-2}$，种植作物农田和裸地的净辐射差异最为明显，农田相较于裸地其日峰值出现的时刻有滞后效应，滞后约1 h。(3) 裸地净辐射年曝辐量与棉田相差1147.8 $MJ \cdot m^{-2}$，与玉米田相差1519.7 $MJ \cdot m^{-2}$。(4) 裸地、棉田和玉米田的地表反照率均表现为冬月较大，其年均值分别为0.34、0.23和0.25，裸地的地表反照率年均值高于有农作物种植的农田下垫面，最大相差0.11，降雨过程会使地表反照率减小，而降雪过程则相反。

关 键 词：绿洲农田下垫面；地表辐射收支；地表反照率；石河子垦区

文章编号：1000－6060(2024)12－1991－14(1991～2004)

陆面过程是陆-气间物质与能量交换的主要过程，辐射收支又是其必不可少的一部分[1-2]。太阳辐射是地球上一切生态系统所需能量的主要源泉，是各生态系统正常运转的“驱动器”[3]。国外学者早在20世纪80年代就将辐射收支作为陆面过程研究不可或缺的内容[4]，并进行了大量陆面野外观测试验，在国内也相继开展了相关研究，主要集中在青藏高原地区[5-9]、云贵高原[10]、帕米尔高原[11-12]和天山山脉[13-14]等高寒地带，以及黑河流域[15-18]、塔里木盆地[19-21]、准噶尔盆地[22-23]和锡林河流域[24-27]等干旱与半干旱区，从不同的分析角度呈现了当地的能量传输过程特征，为区域陆面过程的参数化和陆面过程模式的改进提供了重要依据。

绿洲生态系统在调节干旱半干旱区气候环境过程中扮演了重要角色[28-29]，近几十年间，石河子垦区的土地利用类型有着重大转变，其中绿洲农田面

收稿日期：2024-01-22；　**修订日期：**2024-03-12

基金项目：新疆生产建设兵团重大科技项目“天山北坡兵地重点城市污染天气成因、影响机理、监测预警及综合治理关键技术研究与应用示范”(2023AB036)资助

作者简介：张红伟(1997-)，男，硕士研究生，主要从事陆面过程研究. E-mail: ersan@stu.xju.edu.cn

通讯作者：何清(1965-)，男，博士，研究员，主要从事沙漠气象研究. E-mail: qinghe@idm.cn

积增加了3512.66 km²,增长率高达81.58%[30]。绿洲农田是干旱半干旱区典型的地表形态,前人对于绿洲下垫面辐射收支的研究主要集中在黑河中游张掖绿洲[15]、金塔绿洲[31]、鼎新绿洲[32]和新疆昌吉绿洲[28]等地,相关研究表明,不同绿洲区各辐射分量无论曝辐量还是最值均存在较大差异,且出现时间也存在不同,张掖绿洲和昌吉绿洲相比,总辐射日均值最大均出现在6月,分别为628.3 W·m^{-2}和362.4 W·m^{-2},差异较为明显,而最小值出现时间和大小均有所不同。对于不同绿洲区农田下垫面之间的对比研究较多,但对于同一绿洲区农田下垫面上种植不同农作物的对比研究相对较少。结合石河子垦区绿洲农田面积不断扩展的背景下,本文利用乌兰乌苏农业气象试验站3套辐射观测设备2021年4月1日—2022年3月31日观测的辐射数据,研究同一绿洲农田下垫面种植不同农作物对辐射收支及地表反照率的影响,并对比分析不同农田下垫面的差异性,为进一步了解绿洲农田下垫面陆面过程特征提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

石河子垦区位于天山中段绿洲带,北接古尔班通古特沙漠,其地势平缓[33]。乌兰乌苏农业气象试验站(44°17′N,85°51′E,海拔468.2 m)地处新疆绿洲农田生态系统典型区域,位于天山北坡经济带和绿洲农田的中心位置[34](图1a)。该站属于典型温带干旱大陆性气候,年日照时间为2861.8 h,年平均温度7.4 ℃,年均降水量约为230.8 mm,而年蒸发量又高达1604.9 mm,所以作物生长主要依赖于人工灌溉,该试验站地势较为平坦,土壤类型为砂壤土[35]。

1.2 数据获取及处理

观测数据源于乌兰乌苏农业气象实验站,该站处于石河子垦区的西南段,站内布设有涡动相关系统、梯度探测系统、辐射观测系统、农田小气候观测系统和地面气象观测系统等。

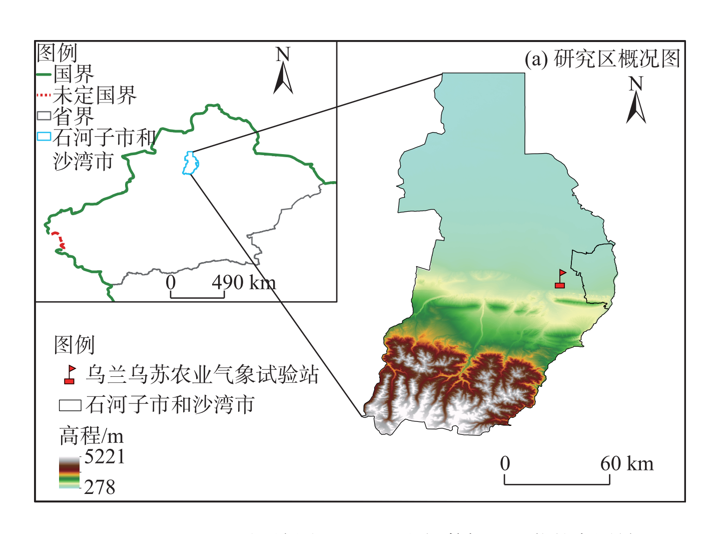
本文数据来自于图2所示3套观测设备,分别为NR01四分量净辐射计、CNR4四分量净辐射计以及DFT1型辐射观测站,位置分布见图1b所示,仪器相关参数见表1。为了提高分析结果的准确性,结合当地日出日落时间,对于向下的短波辐射小于15 W·m^{-2}的无效数据设置为0,剔除明显的野值,并利用R语言对于剔除后的数据和少部分缺失数据进行线性插补,以保证数据的连续性。仪器设备故障或停电等特殊情况会造成数据的缺测,将数据缺测时长大于2 d的时段去除。因所测得的时间数据是地方时,与北京时相差2.27 h,文中将时间数据进行格式统一,均采用北京时间。本文采用2021年4月1日—2022年3月31日CNR4四分量净辐射计和DFT1型辐射观测站观测的逐小时数据以及NR01四分量净辐射计观测的30 min数据。

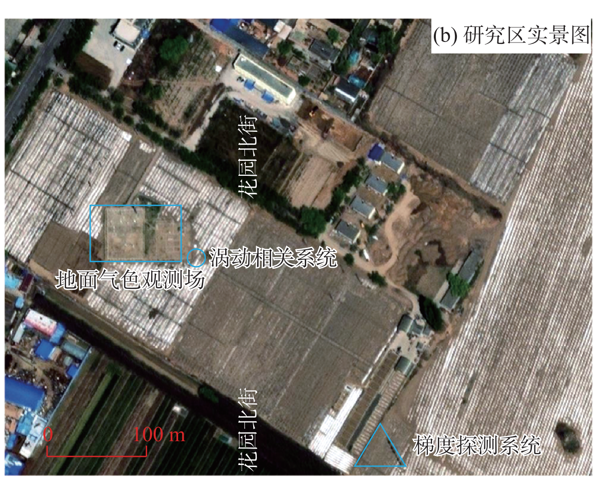
1.3 研究方法

利用NR01四分量净辐射计和CNR4四分量净辐射计观测的向下短波辐射、向上短波辐射、向下长波辐射和向上长波辐射,对于净辐射和地表反照率通过下式进行计算[36]:

$$R_n = SW + LW = DR - UR + DLR - ULR \tag{1}$$

$$a = UR/DR \tag{2}$$





注:该图基于地理空间数据云下载的审图号GS(2022)1873号的标准地图制作,地图边界无修改。

图1 乌兰乌苏农业气象试验站概况

Fig. 1 Overview diagram of Wulanwusu Agricultural Meteorological Experimental Station

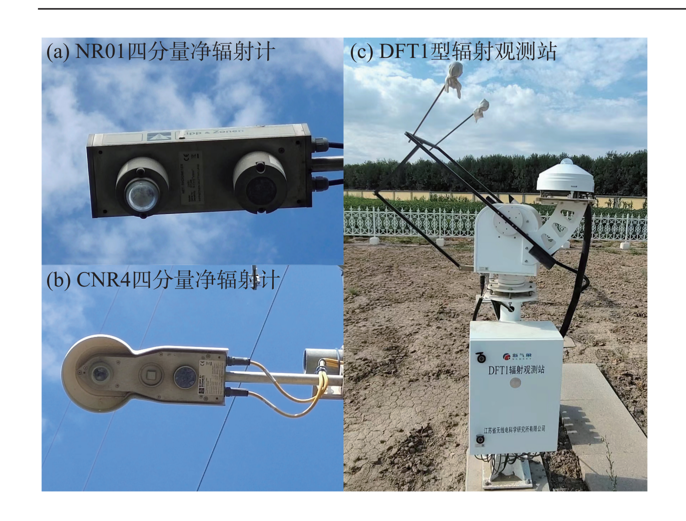


图2　观测设备图

Fig. 2　Observation equipment diagram

式中：R_n为净辐射；SW为短波辐射；LW为长波辐射；DR为向下短波辐射；UR为向上短波辐射；DLR为向下长波辐射；ULR为向上长波辐射；a为地表反照率。

DFT1型辐射观测站中采用全自动太阳跟踪器作为辐射表的工作平台，测定直接辐射的进光筒与太阳入射光线平行，即辐射仪接受面与太阳光线垂直，因此要将太阳直接辐射的观测值换算成水平面上的辐射值，换算公式如下[37-38]：

$$\sin h=\sin\varphi\sin\delta+\cos\varphi\cos\delta\cos t \quad (3)$$

$$\delta=0.409\sin(0.0172N-1.39) \quad (4)$$

$$R_b=R'_b\sin h \quad (5)$$

式中：h为太阳高度角；φ为地理纬度；δ为赤纬；t为时角；N为一年中的日序数(1月1日为0，12月31日为364)；R_b为换算后的水平直接辐射观测值；R'_b为直接辐射的观测值。

2　结果与分析

根据当地对于农作物生长状况的观测，生长发育期为4—10月，其余月份为非生长发育期。棉花是绿洲农田中主要的农作物，其全生育期可以分为播种期、出苗期、现蕾期、开花期和吐絮期5个阶段，棉花在现蕾期是一个转折时期，在现蕾期之前棉花的植株矮小、生长较为缓慢，而在现蕾期之后，随着气温的增加，棉花植株快速生长，直至盛花期叶面积指数达到最大[39]；玉米的生育期可以分为苗期阶段(播种-拔节)、穗期阶段(拔节-抽雄)和花粒期阶段(抽雄-成熟)，玉米在穗期阶段茎秆和叶片快速生长，直至叶片全部展开，叶面积达到最大，此阶段是玉米生长发育最为旺盛的时段[40]。2021年乌兰乌苏农业气象试验站棉花和玉米发育期详情见表2。

2.1　辐射通量日均值变化

石河子垦区绿洲农田下垫面2021年4月1日至2022年3月31日的地表辐射分量日均值变化如图3所示，包括种植棉花和玉米以及裸地3种不同情况。在非生长发育期，同区域农田状态相近，CNR4和NR01 2种型号四分量净辐射计观测的同一辐射分量之间差异性不显著(T检验P>0.05，表3)，利用两者分析生长发育期种植不同作物下垫面的差异性具有一定的代表性。

表1　仪器及参数

Tab. 1　Instruments and parameters

名称	安装高度/m	农作物类型	气象变量	测量范围	最大允许误差(日总量±)	仪器型号/产地
DFT1型辐射观测站	2	裸地	总辐射	0~2000 W·m^{-2}	5%	江苏省无线电科学研究所DFT1型/中国
			反射辐射	0~1400 W·m^{-2}	5%	
			散射辐射	0~1400 W·m^{-2}	5%	
			净辐射	-200~1400 W·m^{-2}	≤8 MJ为0.4%，>8 MJ为5%	
			直接辐射	0~1400 W·m^{-2}	1%	
CNR4四分量净辐射计	4	玉米	短波辐射	300~2800 nm	5%	Kipp & Zonen CNR4/荷兰
			长波辐射	4500~42000 nm	5%	
			净辐射	-250~250 W·m^{-2}	10%	
NR01四分量净辐射计	3	棉花	短波辐射	285~3000 nm	5%	Kipp & Zonen NR01/荷兰
			长波辐射	4500~40000 nm	5%	
			净辐射	-250~250 W·m^{-2}	10%	

表2 2021年乌兰乌苏站棉花和玉米发育期各阶段日期

Tab. 2 Dates of all stages of cotton and maize development at Wulanwusu Station in 2021

农作物类型	生长发育期										
棉花	播种	出苗	三真叶	五真叶		现蕾	开花	裂铃	吐絮	成熟	收获
日期(月-日)	04-12	05-02	05-20	05-26		06-03	07-02	08-31	08-31	10-04	10-05
玉米	播种	出苗	三叶	七叶	拔节	抽雄	开花	吐丝	乳熟	成熟	收获
日期(月-日)	04-09	04-22	04-24	05-08	05-28	06-20	06-21	06-22	07-26	08-26	08-27

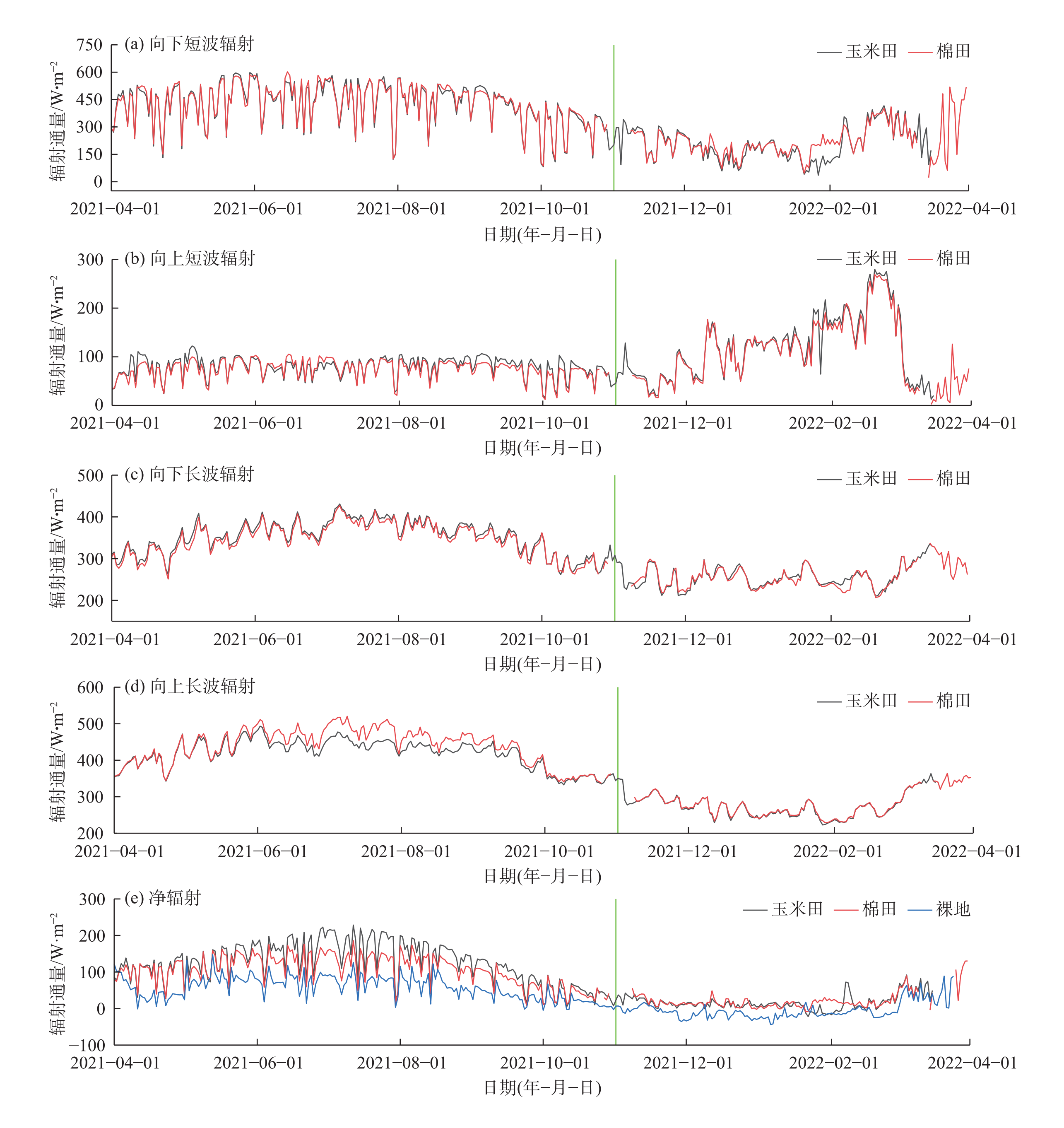


图3 地表辐射分量日均值变化

Fig. 3 Daily mean value change of the surface radiation component

向下短波辐射是太阳辐射直接作用于地表的辐射通量，也是地表能量的主要来源。向下短波辐射日均值的大小及其振幅在作物生长发育期和非生长发育期差异显著，生长发育期大于非生长发育期，且

表3　辐射分量差异性分析（*T*检验）

Tab. 3　Differential analysis of radiation components (*T*-test)

要素名称	数据范围	t值	自由度	P值
向下短波辐射	整年	−0.692	698.3	0.489
	发育期	−0.501	422.8	0.617
	非生长发育期	−1.238	234.9	0.217
向上短波辐射	整年	1.155	698.7	0.121
	发育期	2.295	421.8	0.022*
	非生长发育期	0.604	241.7	0.546
向下长波辐射	整年	1.054	697.6	0.292
	发育期	1.588	422.9	0.113
	非生长发育期	0.479	241.9	0.632
向上长波辐射	整年	−1.869	690.1	0.062
	发育期	−4.366	400.1	$1.612\times10^{-5*}$
	非生长发育期	−0.496	241.8	0.619>0.05
净辐射（CNR4−NR01）	整年	1.941	663.5	0.0527
	发育期	4.154	396.4	$3.997\times10^{-5*}$
	非生长发育期	−1.489	232.9	0.137
净辐射（NR01−DFT1）	整年	10.931	654.0	$2.2\times10^{-16*}$
	非生长发育期	9.961	240.7	$8.6\times10^{-20*}$
净辐射（CNR4−DFT1）	整年	11.426	569.1	$2.2\times10^{-16*}$
	非生长发育期	12.535	238.3	$5.1\times10^{-28*}$

注：*T*检验中，t值表示回归系数与零假设之间的偏离程度；P值代表不接受原假设最小的显著性水平（"*"表示P<0.05，差异性显著）。

季节变化表现为春夏季>秋季>冬季；棉田的向下短波辐射通量最大、最小日均值分别出现在6月15日（601.9 W·m^{-2}）和3月15日（22.33 W·m^{-2}），玉米田的向下短波辐射通量最大和最小日均值出现在5月30日（597.8 W·m^{-2}）和1月27日（35.14 W·m^{-2}）。在生长发育期内，棉田与玉米田最大相差为59.68 W·m^{-2}，出现在6月15日。总体分析，型号不同的辐射观测设备对于同区域向下短波辐射的影响较小，之间差异性不大（*T*检验P=0.489>0.05）。

向上短波辐射是太阳总辐射由于地表反射作用而重新作用于大气的辐射通量，此部分辐射通量不被地表吸收利用，其大小与地表覆盖密切相关。向上短波辐射通量冬季明显高于其他季节，这是因为研究区冬季长时间被积雪覆盖。向上短波辐射最大和最小日均值出现的日期分别为2月19日和3月15日，棉田为269.02 W·m^{-2}和2.23 W·m^{-2}，玉米田为279.78 W·m^{-2}和12.75 W·m^{-2}，两者向上短波辐射出现最值的日期相同。在生长发育期内随2种农作物的生长而有明显的不同，具体表现在4月到5月末玉米田大于棉田，5月末至7月上旬棉田大于玉米田。在此时段内棉花处于五真叶阶段至开花期，玉米处于拔节期至吐丝阶段，也称玉米的穗期。在穗期，叶片、茎节等营养器官快速生长，叶片面积快速增大，玉米生长发育旺盛，是玉米田向上短波辐射日均值小于棉田的主要原因，从7月上旬至发育期结束又变为玉米田大于棉田。在发育期内，棉田与玉米田的向上短波辐射差异性显著（*T*检验P=0.022<0.05），最大相差33.74 W·m^{-2}，出现在4月9日。

向下长波辐射是大气吸收地面长波辐射之后，经吸收转化然后向地面发射的长波辐射，也称为大气逆辐射。向下长波辐射季节变化上表现为夏季最大，春、秋季次之，冬季最小。日均值最大出现在7月7日，最小值出现在2月20日。棉田和玉米田最值出现日期相同，最大值棉田为426.97 W·m^{-2}，玉米田为430.84 W·m^{-2}，最小值棉田为206.71 W·m^{-2}，玉米田为210.13 W·m^{-2}。最大差值为20.15 W·m^{-2}，出现在5月7日。在生长发育期无论种植棉花还是玉米，对于向下长波辐射的影响不大，两者的差异性相对较小（*T*检验P=0.113>0.05）。

向上长波辐射是地表受太阳短波辐射和大气向下的长波辐射作用后，地表向大气发射的长波辐射。在季节上亦表现为夏季最大，春、秋季次之，冬季最小。棉田向上长波辐射最大最小值分别出现在7月9日和1月28日，为520.37 W·m^{-2}和228.91 W·m^{-2}；玉米田向上长波辐射最大出现在6月2日，为493.22 W·m^{-2}，最小值出现在1月27日，为222.65 W·m^{-2}。在生长发育期内种植不同农作物对于向上长波辐射的影响相对较大（*T*检验P=1.612×10^{-5}<0.05），在5月初开始至生长发育期结束，向上的长波辐射整体上表现出棉田高于玉米田的特征，差值最大出现在7月26日，为54.82 W·m^{-2}。

净辐射是地表吸收与放出辐射通量的差值，季节变化明显。3种不同情况的下垫面都表现为夏季最大，春季和秋季次之，冬季最小，且发育期内普遍高于非生长发育期的特征。从振幅上看，夏、春季>秋季>冬季。在生长发育期内，净辐射日均值表现为玉米田高于棉田，非生长发育期两者的差异较小，裸地上的净辐射整体要低于有农作物种植的农田下垫面，尤其在生长发育期表现的更为明显，差异性显著（*T*检验P=2.2×10^{-16}<0.05）。玉米田的净辐射日均值

最大为228.47 W·m^{-2},出现在7月12日,最小值出现在1月22日,为−21.79 W·m^{-2};棉田的净辐射日均值最大为186 W·m^{-2},出现日期也是7月12日,最小值出现在1月21日,为−8.61 W·m^{-2};裸地的净辐射日均值最大出现在5月13日,为147.63 W·m^{-2},最小值出现在1月6日,为−43.83 W·m^{-2}。棉田和玉米田净辐射日均值相差最大为65.98 W·m^{-2},出现在6月29日;玉米田和裸地最大相差133.90 W·m^{-2},出现在7月26日;棉田和裸地最大相差98.09 W·m^{-2},出现在4月15日。

2.2 辐射通量月均值日变化

石河子垦区绿洲农田下垫面地表辐射月均值日变化如图4所示,月均值日变化即同月每天相同时刻的均值,表征此月份各辐射分量日变化的共

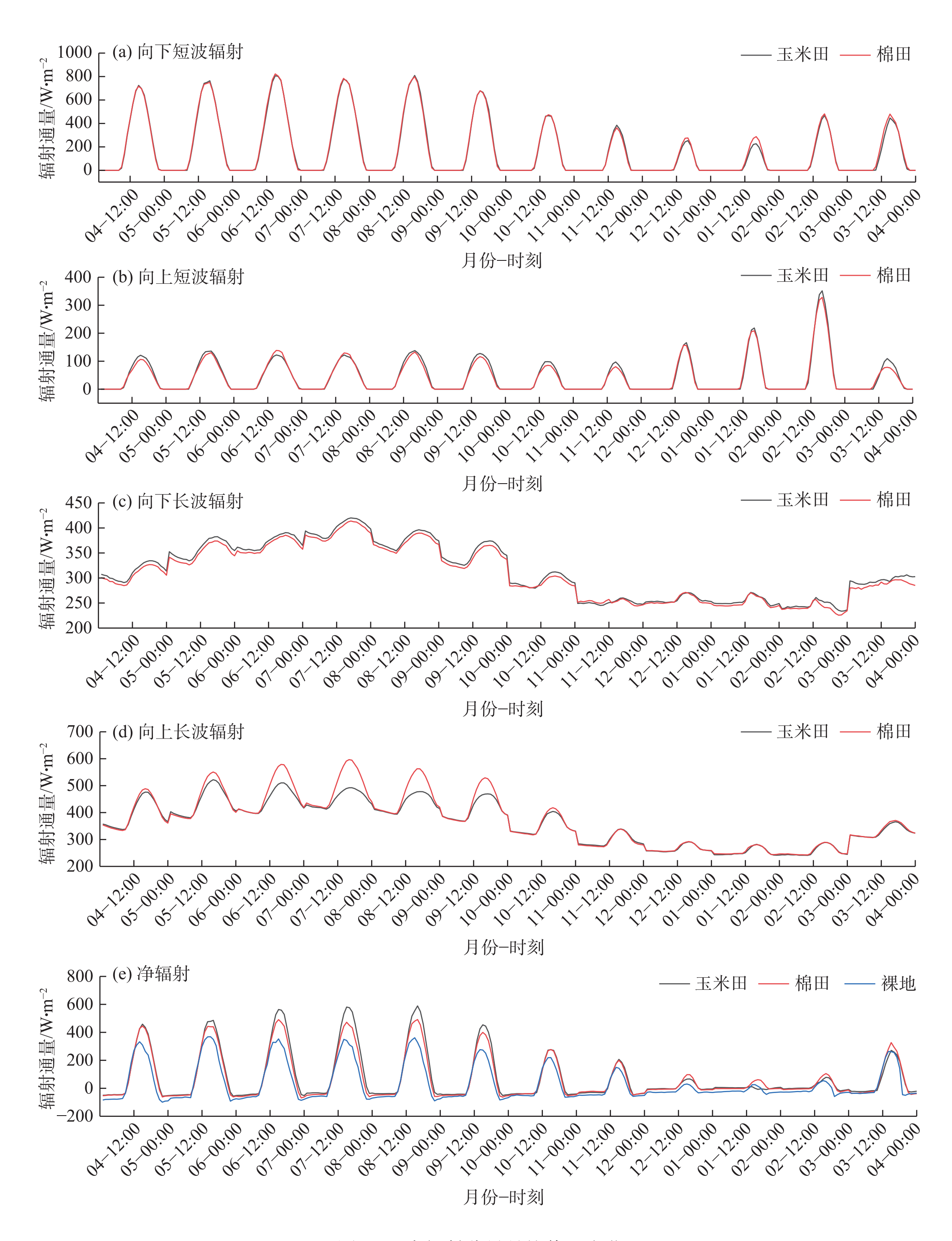


图4 地表辐射分量月均值日变化

Fig. 4 Daily variation of monthly average values of surface radiation component

性。向上、向下的短波辐射和向上的长波辐射以及净辐射都表现出明显的单峰型特征，日变化明显，而向下的长波辐射变化则较为平缓。

向下短波辐射月均值日变化表现为生长发育期高于非生长发育期，棉田最大、最小日峰值分别出现在6、12月，极值为822.46 W·m^{-2}、276.23 W·m^{-2}；玉米田最大、最小日峰值分别出现在8、1月，极值为809.31 W·m^{-2}、226.78 W·m^{-2}，日峰值均出现在15:00左右，两者之间差异最大出现在1月，极值相差为60.67 W·m^{-2}，其他月份基本相等，差异较小。

向上短波辐射月均值日变化表现为冬月要远高于其他月份，在冬月因地表长时间有积雪覆盖，日变化幅度较大。两套设备观测的向上短波辐射极大值均出现在2月，分别为352.39 W·m^{-2}（玉米田）和327.98 W·m^{-2}（棉田），极值相差24.41 W·m^{-2}，日峰值出现在15:00左右；玉米田最小日峰值出现在11月，极值为97.22 W·m^{-2}，棉田最小日峰值出现在3月，极值为78.20 W·m^{-2}，日峰值出现在14:00左右。在生长发育期内，棉田在6月和7月其向上短波辐射月均日峰值要高于玉米田，最大相差16.35 W·m^{-2}，出现在6月，其余月份均表现为棉田低于玉米田的特征，最大相差14.64 W·m^{-2}，出现在4月。

向下长波辐射月均值日变化依旧表现出生长发育期高于非生长发育期的特征，最大、最小日峰值分别出现在7月和11月，玉米田为420.04 W·m^{-2}和260.18 W·m^{-2}，棉田为413.85 W·m^{-2}和258.75 W·m^{-2}，日峰值均出现在16:00。在生长发育期内，无论是白天还是夜晚，向下长波辐射的月均值整体都表现出玉米田高于棉田，但两者的差异不大，日峰值最大相差为8.93 W·m^{-2}，出现在9月。

向上长波辐射月均值日变化明显呈单峰型，与向下的短波、长波辐射变化趋势相近，日峰值都是生长发育期整体高于非生长发育期。棉田中向上长波辐射的月均值最大、最小日峰值分别出现在7、1月，为596.54 W·m^{-2}和280.84 W·m^{-2}；玉米田中向上长波辐射的月均值最大、最小日峰值分别出现在5月（521.97 W·m^{-2}）和1月（281.99 W·m^{-2}）。非生长发育期内两者的差异较小，但在生长发育期内棉田明显高于玉米田，两者日峰值最大相差出现在7月，差值为104.18 W·m^{-2}。

净辐射月均值日变化趋势与向下短波辐射相似，其日峰值在有农作物种植的农田下垫面要整体高于裸地。种植农作物的农田下垫面中日峰值出现的时刻相较于裸地下垫面有滞后效应，滞后约1 h，这是因为作物进行光合作用和蒸腾作用会吸收部分辐射能量，并且有作物的农田下垫面较裸地湿度高、温度低。棉田净辐射月均值最大、最小日峰值分别出现在8月和1月，为491.87 W·m^{-2}和61.81 W·m^{-2}；玉米田净辐射月均值最大、最小日峰值分别出现在8月和1月，为589.19 W·m^{-2}和11.12 W·m^{-2}；裸地净辐射月均值最大、最小日峰值分别出现在5月和1月，为368.58 W·m^{-2}和26.23 W·m^{-2}。在生长发育期内3种不同情况下，净辐射月均值日峰值之间的差值较大，玉米田与棉田、玉米田与裸地最大相差均出现在7月，值分别为108.64 W·m^{-2}、230.77 W·m^{-2}，而棉田与裸地最大相差出现在6月，为8.00 W·m^{-2}。

2.3 辐射通量曝辐量月变化

曝辐量指某个地方单位时间内能接收到多少辐射能量的特征值，可以反映一定区域内对辐射能量利用的情况。由表4可以看出，在石河子垦区乌兰乌苏农业气象试验站用NR01四分量净辐射计（棉田）观测的向下短波辐射年曝辐量为5371.0 MJ·m^{-2}，月曝辐量最大、最小分别出现在6月和12月，为743.3 MJ·m^{-2}和157.6 MJ·m^{-2}；CNR4四分量净辐射计（玉米田）观测的向下短波辐射年曝辐量为5392.4 MJ·m^{-2}，与棉田相差21.4 MJ·m^{-2}，其月曝辐量最大、最小分别出现在6月和1月，为730.6 MJ·m^{-2}和129.1 MJ·m^{-2}；DFT1型辐射观测站（裸地）观测的总辐射年曝辐量为5282.7 MJ·m^{-2}，月曝辐量最大、最小分别出现在7月和12月，为734.0 MJ·m^{-2}和163.7 MJ·m^{-2}。3套辐射观测设备之间DFT1型辐射观测站与另外2套辐射观测仪器差异较大，总辐射（向下短波辐射）年曝辐量最大相差109.7 MJ·m^{-2}。

棉田和玉米田中向上短波辐射年曝辐量为1256.9 MJ·m^{-2}和1357.1 MJ·m^{-2}，两者最大、最小月曝辐量均出现在2月和11月，棉田中的最值为196.9 MJ·m^{-2}和39.2 MJ·m^{-2}，玉米田中的最值为205.3 MJ·m^{-2}和59.7 MJ·m^{-2}，两者年曝辐量相差100.2 MJ·m^{-2}。

对于向下长波辐射的年曝辐量而言，棉田为9307.1 MJ·m^{-2}，最大、最小月曝辐量分别出现在7月和11月，为1052.6 MJ·m^{-2}和498.5 MJ·m^{-2}，而玉米田向下长波辐射年曝辐量为9851.6 MJ·m^{-2}，最大、最小月曝辐量分别出现在7月和2月，为1070.2 MJ·m^{-2}和

表4 2021年4月至2022年3月石河子垦区绿洲农田下垫面辐射通量逐月曝辐量变化

Tab. 4 Changes of radiation flux of oasis farmland in Shihezi reclamation area from April 2021 to March 2022 /MJ·m^{-2}

仪器	要素	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	年曝辐量
NR01四分量净辐射计（棉田）	DR	586.5	709.2	743.3	728.0	699.1	528.8	311.8	162.2	157.6	168.6	279.1	296.8	5371.0
	UR	92.8	124.5	129.9	125.1	118.9	96.8	60.5	39.2	92.1	126.8	196.9	53.5	1256.9
	DLR	793.4	936.8	946.1	1052.6	991.8	883.1	689.6	498.5	684.2	670.7	579.3	580.9	9307.1
	ULR	1027.2	1199.2	1219.0	1313.3	1238.1	1110.8	843.0	582.0	713.7	684.0	625.2	674.0	11229.6
	R_n	259.8	322.3	340.4	342.2	333.9	204.4	97.9	39.5	36.0	28.5	36.4	150.2	2191.6
CNR4四分量净辐射计（玉米田）	DR	589.3	709.2	730.6	720.2	696.9	526.8	336.0	229.5	143.5	129.1	269.2	312.2	5392.4
	UR	106.7	134.6	120.4	122.8	132.4	109.7	75.3	59.7	92.2	123.2	205.3	74.8	1357.1
	DLR	809.1	955.2	955.8	1070.2	1003.4	896.7	781.5	648.5	676.1	667.2	590.6	797.3	9851.6
	ULR	1019.3	1172.3	1145.6	1204.3	1155.0	1060.5	930.3	767.3	697.7	666.2	619.9	885.0	11323.4
	R_n	272.4	357.5	420.4	463.4	412.9	253.4	111.8	51.0	29.7	6.9	34.5	149.7	2563.5
DFT1型辐射观测站（裸地）	总辐射	411.6	729.0	721.2	734.0	693.0	509.5	329.4	225.3	163.7	185.0	277.7	303.5	5282.7
	反射辐射	194.3	197.4	197.2	196.5	191.6	148.2	86.5	73.3	116.7	139.9	211.7	63.7	1817.0
	直接辐射	235.9	489.0	472.6	514.0	490.0	341.3	191.4	105.9	40.6	32.5	93.0	131.1	3137.3
	散射辐射	175.7	240.1	248.6	220.0	203.0	168.2	138.0	119.4	123.0	152.5	184.7	172.4	2145.4
	R_n	123.2	216.6	193.9	199.1	183.0	94.5	46.6	−10.2	−45.6	−46.4	−27.2	116.2	1043.8

注：DR为向下短波辐射；UR为向上短波辐射；DLR为向下长波辐射；ULR为向上长波辐射；R_n为净辐射。

590.6 MJ·m^{-2}，两者年曝辐量相差544.5 MJ·m^{-2}。

棉田向上长波辐射年曝辐量为11229.6 MJ·m^{-2}，最大、最小月曝辐量和向下长波辐射的出现月份相同，分别为1313.3 MJ·m^{-2}和582.0 MJ·m^{-2}；玉米田向上长波辐射年曝辐量为11323.4 MJ·m^{-2}，最大、最小月曝辐量分别出现在7月和2月，为1204.3 MJ·m^{-2}和619.94 MJ·m^{-2}，两者年曝辐量相差93.8 MJ·m^{-2}。棉田净辐射年曝辐量为2191.6 MJ·m^{-2}，最大、最小月曝辐量分别出现在7月(342.2 MJ·m^{-2})和1月(28.5 MJ·m^{-2})，而玉米田净辐射年曝辐量为2563.5 MJ·m^{-2}，最大、最小月曝辐量分别出现在7月(463.4 MJ·m^{-2})和1月(6.9 MJ·m^{-2})，两者年曝辐量相差371.9 MJ·m^{-2}。在同区域不种植农作物，且地表无植被覆盖的情况下净辐射年曝辐量为1043.8 MJ·m^{-2}，与棉田相差1147.8 MJ·m^{-2}，与玉米田相差1519.7 MJ·m^{-2}，由此可以看出在农田下垫面中有无植被覆盖会直接影响净辐射通量的变化趋势和大小。

2.4 地表反照率变化

地表反照率是地表对于太阳总辐射的反射程度。影响地表反照率大小的因素包括地表粗糙度、土壤类型和土壤含水量等地表的物理因素，还与大气状况以及太阳的直射点的运动变化相关。图5是石河子垦区乌兰乌苏农业气象试验站在2021年4月—2022年3月的地表反照率月平均日变化，该地区冬季地表反照率明显高于其他季节，在生长发育

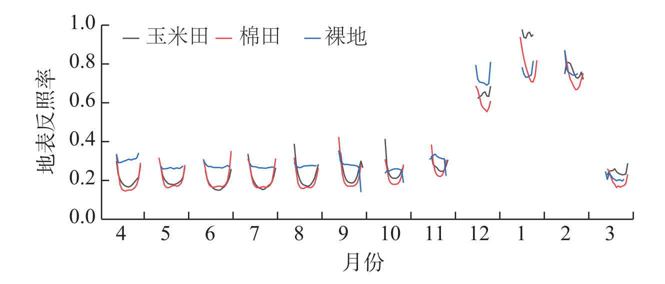


图5 2021年4月至2022年3月石河子垦区绿洲农田下垫面地表反照率月均值日变化

Fig. 5 Daily change of monthly mean surface albedo on the underlying surface of oasis farmland in Shihezi reclamation area from April 2021 to March 2022

期，裸地要明显高于有农作物种植的农田下垫面。从日变化幅度来看，无任何植被覆盖的裸地形态要小于有农作物种植的农田下垫面，且裸地下垫面地表反照率表现为日出时有短暂高值然后出现小幅下降，到一定值后会持续一段时间，而有农作物种植的农田下垫面上的地表反照率大致表现为"U"型，日出和日落邻近时段高于正午时段，变化幅度相对较大，与无植被覆盖的裸地相比，其特征明显不同。

由表5可知，CNR4四分量净辐射计观测的地表反照率在1月达到最大(0.95)，6月出现最小值(0.16)，年平均为0.25；NR01四分量净辐射计观测的地表反照率在1月达到最大(0.75)，4月出现最小值(0.16)，年平均为0.23；DFT1型辐射观测站观测

表5　2021年4月至2022年3月石河子垦区绿洲农田下垫面地表反照率月均值变化

Tab. 5　Monthly mean change of surface albedo of oasis farmland in Shihezi reclamation area from April 2021 to March 2022

仪器	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	平均值
CNR4四分量净辐射计	0.18	0.19	0.16	0.17	0.19	0.21	0.22	0.26	0.64	0.95	0.76	0.24	0.25
NR01四分量净辐射计	0.16	0.18	0.17	0.17	0.17	0.18	0.19	0.24	0.58	0.75	0.71	0.18	0.23
DFT1型辐射观测站	0.47	0.27	0.27	0.27	0.28	0.29	0.26	0.33	0.71	0.76	0.76	0.21	0.34

的地表反照率最大为0.76，出现在1月和2月，最小出现在3月（0.21），年平均为0.34。玉米田、棉花田下垫面地表反照率年平均值相差0.02，差异相对较小，而同区域的裸地与有农作物种植的农田下垫面地表反照率年均值最大相差0.11。有农作物种植的农田下垫面，6、7月地表反照率相较于5月有些减小，这是因为玉米此时正处于拔节-抽雄阶段，棉花正处于现蕾期，2种农作物在此时叶面积快速增大，地表植被覆盖率增加，地表粗糙度降低。

2.5　不同降水过程下各辐射通量及地表反照率的变化

不同降水过程会对地表反照率和各辐射分量产生一定影响。为探究绿洲农田不同降水过程对其变化特征的影响，选取时间连续的降雨过程（2021年5月10日—2021年5月14日）和降雪过程（2022年2月14日—2022年2月19日）对其进行分析，降水过程对应的降水量如表6所示，天气状况信息源于乌兰乌苏站的地面气象观测场观测的数据。

选定的降雨过程在5月12日降水量达到最大，为11.6 mm，5月11日开始出现降水，于5月13日结束。从图6可以看出，降雨对各辐射分量和地表反照率均有减弱作用，自5月11日开始出现降水，由于地表湿度增加，地表反照率开始出现减小，5月12日的地表反照率处于整个周期的最小值，玉米田为0.18，棉田为0.16，降雨结束后又回升到降雨前，玉米田和棉田的变化趋势相似，无明显差异。

降雪过程在2月16日降水量达最大，为2.9 mm，2月15日开始出现降雪，2月18日结束，2月16日地表反照率达最大，玉米田和棉田分别为0.93和0.85，此段降雪过程降水量较少，地表反照率变化幅度不明显，但依旧可以看出降雪会使其增大，降雪结束后，又出现一定程度的减小。玉米田和棉田变化特征相似，差异不明显。

降水过程中云量和水汽增多，大气透明度降低，地表温度下降，由图7可以看到，向下、向上的短波辐射明显减弱，向下、向上的长波辐射的变化较短波辐射要小。降雨过程中向下的长波辐射较向上的长波辐射变化更明显，而在降雪过程中向上长波辐射的变化要比向下长波辐射明显。棉田和玉米田相比，地表反照率和辐射通量的变化特征相似，差异较小。

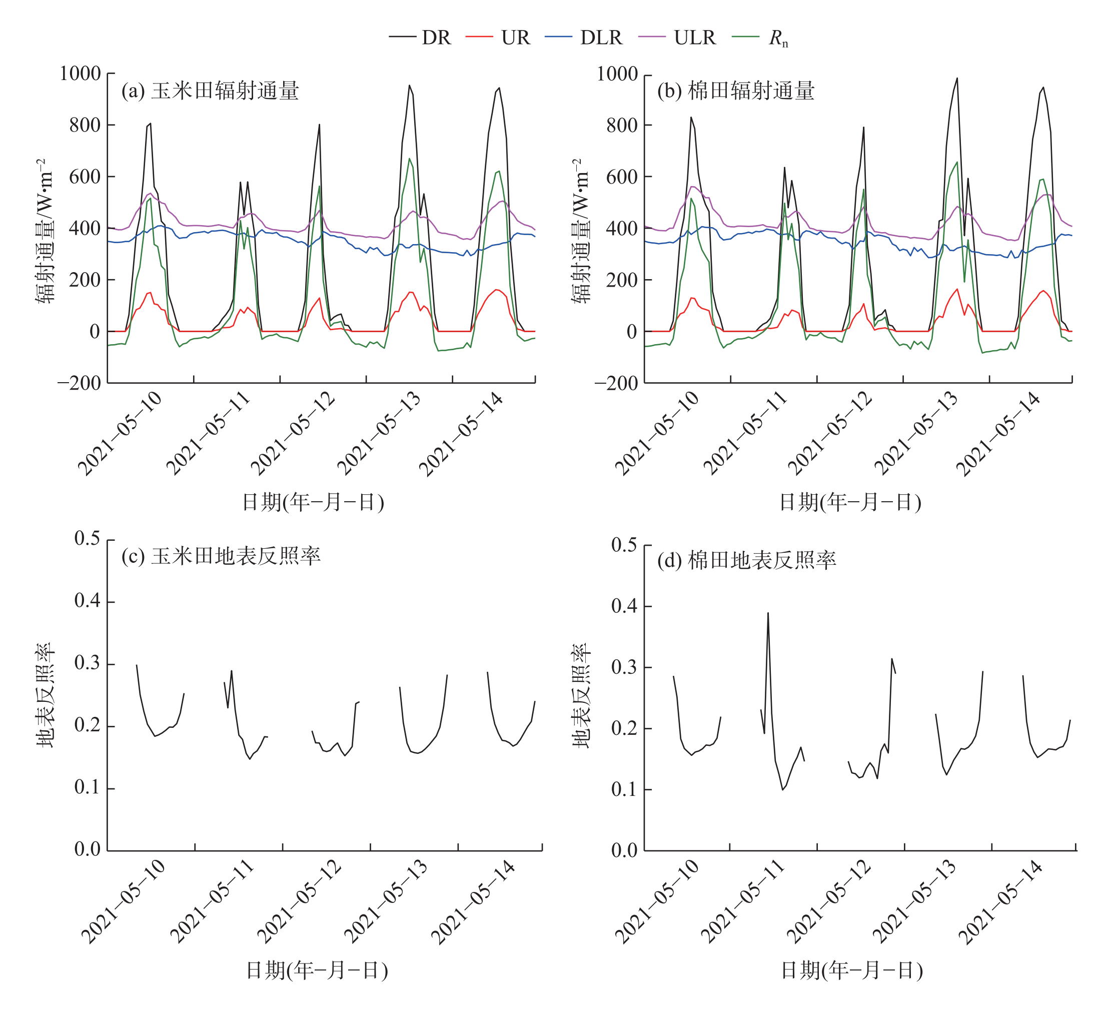
3　讨论

石河子垦区绿洲农田下垫面上太阳总辐射最大瞬时值分别为998.81 W·m^{-2}（玉米田）、1017 W·m^{-2}（棉田）和1140 W·m^{-2}（裸地），无超出太阳常数的现象。在植物生长发育期，农田地表形态主要取决于耕作的农作物，不同作物的农田各辐射分量特征差异明显，尤其是向上的长、短波辐射差异相对较大。在非生长发育期同一区域农田下垫面辐射收

表6　降水过程降雨量及地表反照率日均值

Tab. 6　Daily mean values of precipitation and surface albedo during precipitation

降水类型	日期(年-月-日)	降水量/mm	地表反照率日均值		降水类型	日期(年-月-日)	降水量/mm	地表反照率日均值	
			玉米田	棉田				玉米田	棉田
降雨	2021-05-10	0.0	0.21	0.19	降雪	2022-02-14	0.0	0.78	0.76
	2021-05-11	4.3	0.19	0.17		2022-02-15	0.2	0.81	0.77
	2021-05-12	11.6	0.18	0.16		2022-02-16	2.9	0.93	0.85
	2021-05-13	0.2	0.19	0.18		2022-02-17	0.5	0.72	0.74
	2021-05-14	0.0	0.20	0.18		2022-02-18	0.2	0.77	0.77
						2022-02-19	0.0	0.71	0.73



注：DR为向下短波辐射；UR为向上短波辐射；DLR为向下长波辐射；ULR为向上长波辐射；R_n为净辐射。下同。

图6 降雨过程辐射通量及地表反照率变化

Fig. 6 Changes in radiant flux and surface albedo during rainfall

支特征理应相似，但实际上三者之间仍存在一定差异，CNR4和NR01四分量净辐射计之间的差异较小，净辐射差值平均为3.35 W·m^{-2}，而DFT1型辐射观测站与两者之间的差异较为明显，其净辐射日均值整体上低于上述2种四分量辐射计，差值平均为24.12 W·m^{-2}和27.47 W·m^{-2}，存在差异的主要原因是辐射观测设备型号和安装高度的不同。

本文使用的是不同型号辐射观测设备监测的数据，在生长发育期对比不同作物对辐射收支特征存在一定的局限性，但依据CNR4和NR01 2种四分量净辐射计在非生长发育期的差异性分析，两者差异较小，所以本文不同类型作物对地表辐射收支影响的对比研究具有一定代表性，其非生长发育期的差异可用于后期校准的参照，为后续垦区绿洲农田下垫面中相关研究提供更精准的数据。

4 结论

（1）在石河子垦区绿洲农田下垫面中向下短波辐射、向下长波辐射、向上长波辐射和净辐射的日均值在生长发育期要高于非生长发育期，而向上短波辐射冬季最大，振幅变化上亦是如此；NR01四分量净辐射计（棉田）与CNR4四分量净辐射计（玉米田）之间向下、向上的短波辐射和长波辐射日均值最大相差分别为59.68 W·m^{-2}、33.74 W·m^{-2}、20.15 W·m^{-2}和54.82 W·m^{-2}，净辐射日均值相差最大为65.98 W·m^{-2}，玉米田和裸地为133.90 W·m^{-2}，棉田和裸地98.09 W·m^{-2}。

（2）向上、向下的短波辐射和向上的长波辐射以及净辐射都表现出明显的单峰型特征，日变化明显，而向下的长波辐射变化则较为平缓；种植不同农作物，对于各辐射分量月均值日峰值的大小和出现

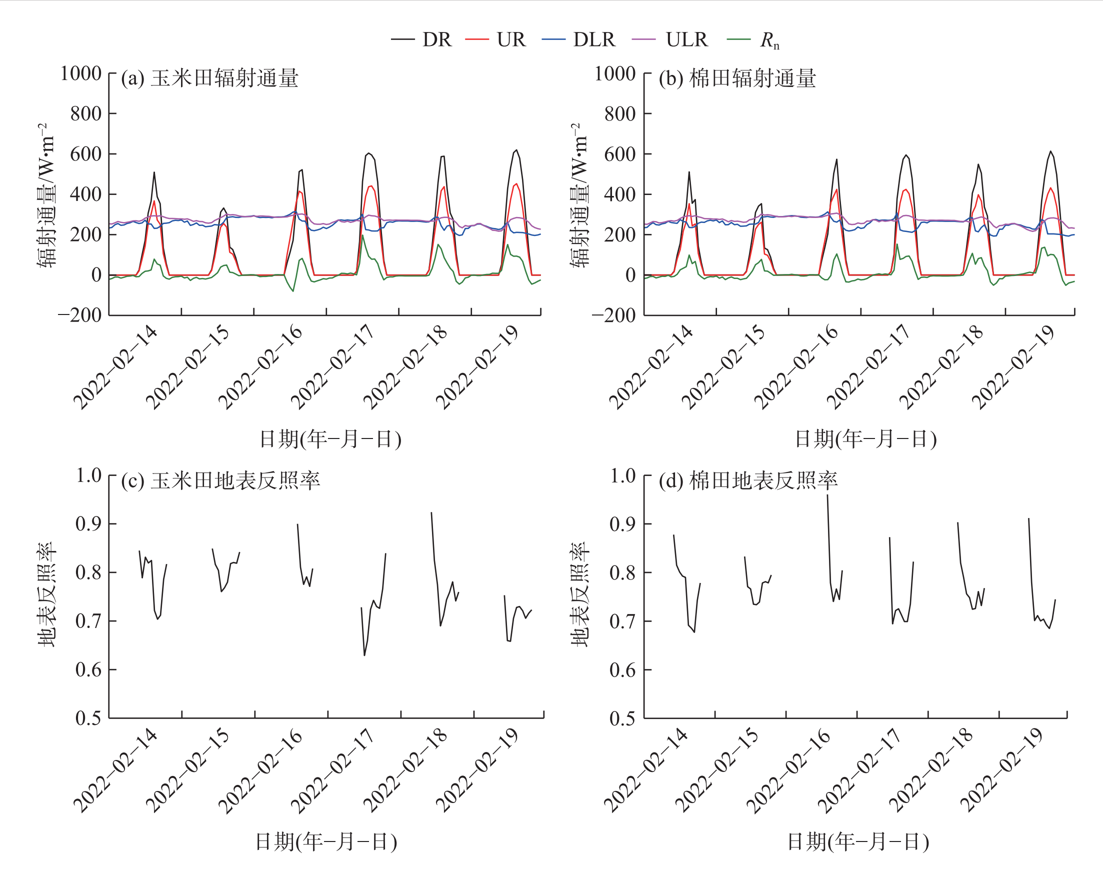


图7　降雪过程辐射通量及地表反照率变化

Fig. 7　Changes in radiant flux and surface albedo during snowfall

时间有一定影响，但极值相差不大，向下、向上短波辐射和长波辐射日峰值最大相差分别为60.67 W·m^{-2}、16.35 W·m^{-2}、8.93 W·m^{-2}和104.18 W·m^{-2}；对于净辐射而言，种植农作物的农田下垫面中日峰值出现的时刻相较于裸地下垫面有滞后效应，滞后约1 h，玉米田与棉田最大相差出现在7月，为108.64 W·m^{-2}，玉米田与裸地最大相差出现在7月，为230.77 W·m^{-2}，棉田与裸地最大相差出现在6月，为138 W·m^{-2}。

（3）有农作物种植的下垫面和裸地相比，各辐射分量曝辐量差异明显，而种植不同农作物带来的差异相对较小；种植棉花和玉米以及裸地3种不同农田下垫面上的总辐射年曝辐量分别为5371.0 MJ·m^{-2}、5392.4 MJ·m^{-2}和5282.7 MJ·m^{-2}，最大相差109.7 MJ·m^{-2}；棉田与玉米田的向上短波辐射和向下、向上的长波辐射年曝辐量相差分别为100.2 MJ·m^{-2}、544.5 MJ·m^{-2}、93.8 MJ·m^{-2}；3种不同情况下净辐射的差异性较大，尤其是裸地与有农作物种植的情况，与棉田相差1147.8 MJ·m^{-2}，与玉米田相差1519.7 MJ·m^{-2}。

（4）地表反照率在冬季要明显高于其余季节，在1月达到最大；棉田和玉米田年平均地表反照率分别为0.23和0.25，裸地为0.34，裸地的地表反照率明显高于有农作物种植的农田下垫面。

（5）不同降水过程对地表反照率和各辐射通量的影响也不同，降雨过程会使地表反照率降低，而降雪过程则相反，降水过程中短波辐射的变化较大，长波辐射的变化较短波辐射较小，降雨过程中向下的长波辐射较向上的长波辐射变化更明显，而在降雪过程中向上长波辐射的变化要比向下长波辐射明显，棉田和玉米田相比，地表反照率和辐射通量的变化特征相似，差异不大。

参考文献（References）

[1] 张强, 王胜. 干旱荒漠区土壤水热特征和地表辐射平衡年变化规律研究[J]. 自然科学进展, 2007, 17(2): 211–216. [Zhang Qiang, Wang Sheng. Study on the characteristics of soil hydroheat and surface radiation balance in arid desert areas[J]. Advances in the Natural Sciences, 2007, 17(2): 211–216.]

[2] Hatzianastassiou N, Matsoukas C, Fotiadi A, et al. Global distribution of Earth's surface shortwave radiation budget[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, 5(55): 2847–2867.

[3] 高红贝. 黑河中游绿洲农田水热平衡分析[D]. 咸阳: 中国科学

院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016. [Gao Hongbei. Analysis of water thermal balance of oasis farmland in the middle reaches of Heihe River[D]. Xianyang: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education), 2016.]

[4] 何清, 金莉莉. 塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验成果概述[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2021, 38(3): 334−354. [He Qing, Jin Lili. Summary of meteorological field experiments in the Taklimakan Desert, China[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2021, 38(3): 334−354.]

[5] 武荣盛, 马耀明. 青藏高原不同地区辐射特征对比分析[J]. 高原气象, 2010, 29(2): 251−259. [Wu Rongsheng, Ma Yaoming. Comparative analysis on radiation characteristics in different areas over the Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(2): 251−259.]

[6] 马耀明, 姚檀栋, 王介民. 青藏高原能量和水循环试验研究——GAME/Tibet与CAMP/Tibet研究进展[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 344−351. [Ma Yaoming, Yao Tandong, Wang Jiemin. Experimental study of energy and water cycle in Tibetan Plateau: The progress introduction on the study of GAME/Tibet and CAMP/Tibet[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(2): 344−351.]

[7] 马伟强, 戴有学, 马耀明, 等. 珠峰北坡地区地表辐射和能量季节变化的初步分析[J]. 高原气象, 2007, 26(6): 1237−1243. [Ma Weiqiang, Dai Youxue, Ma Yaoming, et al. Seasonal variations of land surface radiation budget and energy on northern slope of Mt. Qomolangma Area[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(6): 1237−1243.]

[8] 钱泽雨, 胡泽勇, 杜萍, 等. 藏北高原典型草甸下垫面与HEIFE沙漠区辐射平衡气候学特征对比分析[J]. 太阳能学报, 2003, 24(4): 453−460. [Qian Zeyu, Hu Zeyong, Du Ping, et al. Comparison and analysis of the climatological features of radiation balance between the grassy marshy and surface of north of the Tibetan Plateau and the desert in HEIFE[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2003, 24(4): 453−460.]

[9] 强耀辉, 王坤鑫, 马宁, 等. 羌塘高原申扎高寒湿地辐射平衡和地表反照率特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1207−1215. [Qiang Yaohui, Wang Kunxin, Ma Ning, et al. Characteristics of the radiation balance and surface albedo of a typical alpine wetland in Qiangtang Plateau[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1207−1215.]

[10] 陈娟, 徐丹丹, 罗宇翔, 等. 近50年来云贵高原太阳辐射变化特征及影响[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(增刊1): 179−184. [Chen Juan, Xu Dandan, Luo Yuxiang, et al. Changes in solar radiation and their climatic influences over Yunnan-Guizhou Plateau for 1961—2019[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(Suppl. 1): 179−184.]

[11] 王国胜, 何清, 邢红艳, 等. 东帕米尔高原地表辐射收支及地表反照率特征[J]. 高原气象, 2023, 42(3): 619−631. [Wang Guosheng, He Qing, Xing Hongyan, et al. Surface radiation budget and surface albedo characteristics in eastern Pamir Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(3): 619−631.]

[12] 雅森江·库尔班, 王豫, 买买提艾力·买买提依明, 等. 中国帕米尔高原太阳辐射演变规律[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 237−244. [Kurban Yasin, Wang Yu, Mamtimin Ali, et al. Evolution of solar radiation in China Pamir Plateau[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(10): 237−244.]

[13] 肖婉秋, 买买提艾力·买买提依明, 刘永强, 等. 中天山地区草地地表辐射收支演变规律[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4550−4560. [Xiao Wanqiu, Mamtimin Ali, Liu Yongqiang, et al. The rule of grassland surface radiation budget in the middle of Tianshan Mountains[J]. Journal of Ecology, 2022, 42(11): 4550−4560.]

[14] 黄银友. 新疆天山中段地表辐射空间差异分析[D]. 南京: 南京大学, 2019. [Huang Yinyou. Analysis of the surface radiation space difference in the middle section of Tianshan Mountains in Xinjiang[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.]

[15] 吴锦奎, 丁永建, 魏智, 等. 黑河中游间作农田的辐射收支特征分析[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 286−292. [Wu Jinkui, Ding Yongjian, Wei Zhi, et al. Characteristics of radiation budget in intercropping field in the middle reach of Heihe River Basin[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(2): 286−292.]

[16] 季国良, 马晓燕, 邹基玲, 等. 黑河地区绿州和沙漠地面辐射收支的若干特征[J]. 干旱气象, 2003, 21(3): 29−33. [Ji Guoliang, Ma Xiaoyan, Zou Qiling, et al. Characteristics of the radiation budget over oases in arid region[J]. Journal of Arid Meteorology, 2003, 21(3): 29−33.]

[17] 于涛. 绿洲−沙漠系统地表辐射收支的模拟研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 686− 690. [Yu Tao. Simulation of surface radiation balance over the oasis-desert system[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(3): 686−690.]

[18] 王慧, 胡泽勇, 李栋梁, 等. 黑河地区鼎新戈壁与绿洲和沙漠下垫面地表辐射平衡气候学特征的对比分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 464− 473. [Wang Hui, Hu Zeyong, Li Dongliang, et al. Comparative of climatologic characteristics of the surface radiation balance on Dingxin gobi and Zhangye oasis and desert underlaying surfaces in Heihe watershed, Gansu[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 464−473.]

[19] 程丹妮, 王颖琪, 程勇翔, 等. 新疆典型沙漠和绿洲植被−水汽−地表温度相关性分析[J].干旱区地理, 2022, 45(2): 456−466. [Cheng Danni, Wang Yingqi, Cheng Yongxiang, et al. Vegetation-water vapor-land surface temperature correlation analysis of typical deserts and oases in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 456−466.]

[20] 李海花, 闵月, 李桉孛, 等. 昆仑山北麓两次极端暴雨水汽特征对比分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 715−724. [Li Haihua, Min Yue, Li Anbei, et al. Comparative analysis of on water vapor characteristics of two extreme rainstorms in the north slope of Kunlun Mountains[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 715−724.]

[21] 陈佳毅, 赵勇. 伊朗高原和北非感热异常对夏季塔里木盆地降

水的影响[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1357−1369. [Chen Jiayi, Zhao Yong. Effects of sensible heat anomalies in the Iranian Plateau and North Africa on summer precipitation in the Tarim Basin [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1357−1369.]

[22] 魏文寿, 董光荣. 古尔班通古特沙漠的辐射热量交换分析[J]. 中国沙漠, 1997, 17(4): 3−9. [Wei Wenshou, Dong Guangrong. Analysis on radiant thermal exchange in the surface layer of Gurbantunggut Desert, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 1997, 17(4): 3−9.]

[23] 高佳程, 王豫, 阿吉古丽·沙依提, 等. 古尔班通古特沙漠地表辐射收支特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 47−58. [Gao Jiacheng, Wang Yu, Sayit Hajigul, et al. Characteristics of surface radiation budget in Gurbantunggut Desert[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 47−58.]

[24] 韩典辰, 张方敏, 陈吉泉, 等. 内蒙古半干旱区蒸散估算和归因分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1071−1081. [Han Dianchen, Zhang Fangmin, Chen Jiquan, et al. Evapotranspiration of a semiarid landscape in Inner Mongolia: Estimation and attribution[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1071−1081.]

[25] 张果, 周广胜, 阳伏林. 内蒙古荒漠草原地表反照率变化特征[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6943−6951. [Zhang Guo, Zhou Guangsheng, Yang Fulin. Analysis on dynamic characteristics of surface albedo over a desert steppe in Inner Mongolia[J]. Journal of Ecology, 2010, 30(24): 6943−6951.]

[26] 杨帆, 邵全琴, 李愈哲, 等. 北方典型农牧交错带草地开垦对地表辐射收支与水热平衡的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5440−5451. [Yang Fan, Shao Quanqin, Li Yuzhe, et al. Impacts of grassland reclamation on land surface radiation and water-heat fluxes in the farming-pastoral ecotone of northern China[J]. Journal of Ecology, 2016, 36(17): 5440−5451.]

[27] Lu D R. Inner Mongolia semiarid grassland soil vegetation atmosphere interaction (IMGRASS)[J]. Global Change News Letter, 1997, 31: 4−5.

[28] 柳英, 阿吉古丽·沙依提, 买买提艾力·买买提依明, 等. 新疆昌吉绿洲地表辐射收支特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024, 18(1): 66−73. [Liu Ying, Sayit Hajigul, Mamtimin Ali, et al. Characteristics of surface radiation budget in Changji oasis, Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2024, 18(1): 66−73.]

[29] Yi F, Yang Q K, Wang Z J, et al. Changes in land use and ecosystem service values of Dunhuang oasis from 1990 to 2030[J]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 564, doi: 10.3390/rs15030564.

[30] 李长晓. 石河子垦区土地利用变化及水土资源优化配置研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022. [Li Changxiao. Research on land use change and optimal allocation of water and soil resources in Shihezi reclamation area[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022.]

[31] 陈世强, 文莉娟, 吕世华, 等. 金塔绿洲不同下垫面辐射特征对比分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(7): 713−718. [Chen Shiqiang, Wen Lijuan, Lü Shihua, et al. Analysis of characteristics of radiation on different underlying surface in Jinta oasis[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(7): 713−718.]

[32] Zhang Y, Zhao W. Effects of variability in land surface characteristics on the summer radiation budget across desert-oasis region in northwestern China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 119: 771−780.

[33] 王进, 白洁, 陈曦, 等. 新疆绿洲覆膜滴灌棉田碳通量特征研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 70−78, 136. [Wang Jin, Bai Jie, Chen Xi, et al. Carbon fluxes over plastic mulch drip irrigating cotton in Xinjiang oasis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 70−78, 136.]

[34] 塔依尔, 吕新, 杨利勇. 石河子垦区沙漠和绿洲下垫面生态条件下能量交换特征[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 478−482. [Tayir, Lü Xin, Yang Liyong. Energy exchange characteristics over underlying desert oasis surface in Shihezi desert reclamation area[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(3): 478−482.]

[35] 邹陈, 吉春容, 范子昂, 等. 乌兰乌苏绿洲棉田生态系统水汽和二氧化碳通量研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(15): 120−125. [Zou Chen, Ji Chunrong, Fan Zi'ang, et al. Study on fluxes of CO_2 and water vapor of oasis cotton ecosystem in Wulanwusu[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(15): 120−125.]

[36] 买买提艾力·买买提依明, 缪启龙, 金莉莉, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地散射辐射特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1492−1500. [Mamtimin Ali, Miao Qilong, Jin Lili, et al. Characteristics of diffuse radiation at hinterland of the Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1492−1500.]

[37] 周洒洒, 何清, 金莉莉, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘绿洲−荒漠过渡带辐射特征——以肖塘为例[J]. 中国沙漠, 2020, 40(4): 43−51. [Zhou Sasa, He Qing, Jin Lili, et al. Radiation characteristics of the oasis-desert transition zone in the northern margin of the Taklimakan Desert: A case study of Xiaotang[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(4): 43−51.]

[38] 杜尧东, 毛慧琴, 刘爱君, 等. 广东省太阳总辐射的气候学计算及其分布特征[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 66−70. [Du Yaodong, Mao Huiqin, Liu Aijun, et al. The climatological calculation and distributive character of global solar radiation in Guangdong Province[J]. Resources Science, 2003, 25(6): 66−70.]

[39] 季道藩. 棉花知识百科[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 9−17. [Ji Daofan. Cotton knowledge encyclopedia[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 9−17.]

[40] Cheng M H, Wang H D, Fan J L, et al. Effects of soil water deficit at different growth stages on maize growth, yield, and water use efficiency under alternate partial root-zone irrigation[J]. Water, 2021, 13(2): 148, doi: 10.3390/W13020148.

Radiation expenditure characteristics of oasis farmland in Shihezi reclamation area

ZHANG Hongwei[1,2,3,4], HE Qing[4], YANG Mingfeng[2], AN Dongliang[2,3], WU Chunxia[2,3], WANG Jin[2,3], CHEN Feifan[1,2,3,4]

(1. College of Ecology and the Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2. Wulanwusu Special Test Field base of National Integrated Meteorological Observation/Wulanwusu Ecology and Agrometeorology Observation and Research Station of Xinjiang/Wulanwusu Agrometeorological Experiment Station, Shawan 832199, Xinjiang, China; 3. Shihezi Meteorological Bureau, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 4. Institute of Desert Meteorological, China Meteorological Administration/National Observation and Research Station of Desert Meteorological, Taklimakan Desert of Xinjiang/Taklimakan Desert Meteorology Field Experiment Station of China Meteorological Administration/Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and Sandstorm, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Oasis farmland is a unique ecosystem in arid and semi-arid regions, making the study of energy balance and climate formation mechanisms highly significant. Using observational data from oasis farmland in the Shihezi reclamation area, Xinjiang, China collected between April 2021 and March 2022, this study analyzed the variation characteristics of radiation components and surface albedo in oasis subpads. It compared the radiation components over different crop types (cotton and corn) and performed a differential analysis with bare land in the same area. The results indicate the following: (1) The daily means of downward shortwave and longwave radiation, upward longwave radiation, and net radiation on the underlying surface of oasis farmland were higher during the growth period than during the non-growth period. Upward shortwave radiation was maximal in winter, exhibiting the largest amplitude changes during this season. (2) Within the same area, oasis farmland under different crop types exhibited variations in radiation components during the plant growth and development phases. The daily average maximum differences in upward shortwave radiation, longwave radiation, and net radiation were 33.74 $W\cdot m^{-2}$, 54.82 $W\cdot m^{-2}$, and 65.98 $W\cdot m^{-2}$, respectively. The difference in net radiation between farmland with crops and bare land was particularly pronounced, with a lag effect of approximately 1 hour in the daily peak radiation time for farmland compared to bare land. (3) The annual net radiation exposure of bare land differed by 1147.8 $MJ\cdot m^{-2}$ compared to cotton fields and by 1519.7 $MJ\cdot m^{-2}$ compared to corn fields. (4) The surface albedo of bare land, cotton fields, and corn fields was highest in winter, with annual averages of 0.34, 0.23, and 0.25, respectively. The annual average surface albedo of bare land exceeded that of farmland with crops, with a maximum difference of 0.11. Rainfall events reduced surface albedo, while snowfall increased it.

Key words: oasis farmland underlying surface; surface radiation expenditure; surface albedo; Shihezi reclamation area